

开始

输入环节数  $N$ , 外加作用量个数  $N_0$ , 计算步长  $L$ , 每输出一次的计算步数  $L_1$ , 输出总步数  $L_2$

输入外加作用量连接矩阵  $M$

输入《自动化基础知识丛书》

输入外加作用量类型及参数  $R_0, R_1, R_2$

# 系统仿真

计算各环节的离散相似模型系数  $E, F, G$

输入初始条件

计算各环节的输入量  $u_k$  并对输入端的非线性作处理

计算  $x_{k+1}$  及  $y_{k+1}$

对环节后的非线性作处理

计算各环节的输入量  $u_{k+1}$  并对输入端非线性作处理

计算  $x_{k+1}$  及  $y_{k+1}$

对环节后的非线性作处理

输出时间到否?

到

打印输出

是否还要作一次仿真?

到

是否还要作一次仿真?

否

停止

修改参数

科学出版社

73.82  
803

# 系 统 仿 真

熊光楞 编著



科 学 出 版 社

1986

8610764

DT 83/16  
内 容 简 介

系统仿真是自动化领域中的一个重要分支。为了设计出一个品质优良的自动化系统，首先要对系统进行分析与试验，系统仿真就是将系统的数学模型放到计算机上进行试验的一种技术。采用仿真技术来进行试验是一种既安全又经济的试验方法。

本书共分十二章，包括模拟计算机仿真、数字计算机仿真、数字、模拟混合仿真及仿真器等。书中不仅系统地介绍了有关仿真的基本原理，还详细列举了进行仿真的具体方法与步骤，并在书后附有四个数字仿真程序，因此具有一定的科学性 & 较强的实用性。

本书既可作为具有高中以上文化程度的工人、技术人员了解与运用系统仿真技术的参考书，也可作为非自动化专业的大专学生学习系统仿真的参考教材。

## 系 统 仿 真

熊光楞 编 著

责任编辑 姚平录

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986 年 9 月 第 一 版 开本：787×1092 1/32

1986 年 9 月 第一次印刷 印张：7 1/2

印数：0001—4,800 字数：162,000

统一书号：15031·709

本社书号：4756 15-8

定 价：1.35 元

## 前 言

本书是中国自动化学会和科学出版社计划编辑出版的《自动化基础知识丛书》之一。

这套丛书编辑出版的目的，是希望在自动化的实际应用和理论研究之间搭起“桥梁”，向广大读者提供自动化科学技术基础知识和新的信息，有三方面的意图：

1. 向从事自动化实际应用工作的读者，提供必要的理论方法和数学基础，如：控制理论、系统仿真、系统辨识及微分方程、线性代数……等。

2. 向从事自动化理论研究工作的读者，提供有关实际仪表、装置和系统的工程知识，如：检测仪表、调节器、随动系统、自寻最优控制器……等。

3. 向广大对自动化有兴趣的读者，提供自动化科学技术的基本知识和发展动向的信息，如：微电脑、机器人、大系统理论、智能控制系统……等。

近四十年来，自动化科学技术日新月异，在广度和深度上都有重大进展，一方面，从单机自动化、机组自动化向车间、工厂、公司的综合自动化发展；从工程技术领域向社会经济、环境生态领域发展；从小系统的过程控制的局部最优化，向大系统的管理决策的全局最优化发展……另一方面，从常规的自动检测、调节与控制、向人工智能、模式识别、机器人、智能控制系统发展……等。

自动化是实现工业、农业、国防和科学技术现代化的先进手段，是实现优质、高产、低消耗、保安全的有效方法。

也是现代化社会中科学技术发达、人民生活水平提高的显著标志。自动化在国民经济各部门、社会生活各方面的广泛应用。将人们从繁重的体力和脑力劳动中，从危险的、有害的工作环境中解放出来。大大扩展了人类认识自然、改造自然的能力。为迅速发展社会生产力，改善人民生活条件作出巨大贡献。因此，自动化是现代化的“催化剂”，也是现代化的“显影液”。没有自动化，就没有现代化。

我们期望，《自动化基础知识丛书》的编辑出版，能为广大读者提供一个有用的自动化科学技术知识库，为我国的现代化建设服务。

《自动化基础知识丛书》编委会

## 序 言

中国自动化学会与科学出版社为了推广和普及自动化技术，拟共同组织一套《自动化基础知识丛书》，并由科学出版社出版。《系统仿真》是其中的一本。

系统仿真是自动化领域中的一个重要分支。众所周知，为了设计出一个品质优良的自动化系统，首先要对系统进行分析与试验，系统仿真就是将系统的数学模型放到计算机上进行试验的一种技术，因此它也是一种既安全又经济的试验方法。

系统仿真技术已广泛地用于航空、航天、船舶、军工、冶金、电力、化工以及交通管制等各个部门和科研上。随着计算机的普及，系统仿真，尤其是数字仿真，越来越普遍地用于工程设计、研究、教育、操纵人员的训练及分系统试验等各个方面，并取得了十分明显的经济效益。

本书从科学普及的角度，将向广大从事自动化技术或关心自动化技术的读者介绍有关系统仿真的基本原理。由于篇幅有限，本书将着重介绍有关控制系统仿真的各种方法。为了使读者在学习了系统仿真的基本知识之后，能尽快地在自己的工作中加以应用，本书在各章中都列举了进行系统仿真的具体步骤，并在书后附有四个数字仿真程序。

阅读本书的读者最好能具备以下预备知识：控制系统原理及组成，计算机原理，BASIC算法语言等。

本书的提纲和内容曾经过《自动化基础知识丛书编委会》几次讨论并提出了宝贵意见，尤其得到了副主编陈振宇

高级工程师，涂序彦副研究员的热情帮助与指导，全书经编委钟延炯副教授审阅，并提出了许多有益的建议，作者在此一并致谢。

书中的有些程序是由北京控制工程研究所刘志俊、李宝绶，西安交通大学孙国基，清华大学高黛陵等同志提供的，作者在此也向他们致谢。限于水平，书中缺点错误在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

# 目 录

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 前言 .....                           | v   |
| 序言 .....                           | vii |
| 第一章 既安全又经济的试验方法——在模型上<br>作试验 ..... | 1   |
| 1-1 实际系统与模型 .....                  | 1   |
| 1-2 物理仿真与数学仿真 .....                | 3   |
| 1-3 实时仿真与非实时仿真 .....               | 5   |
| 1-4 最常用的两种仿真计算机 .....              | 6   |
| 1-5 混合仿真计算机与并行仿真计算机 .....          | 8   |
| 1-6 计算机仿真的应用 .....                 | 9   |
| 1-7 如何学习本书 .....                   | 10  |
| 1-8 小结 .....                       | 11  |
| 第二章 最早的仿真计算机——模拟计算机 .....          | 13  |
| 2-1 模拟计算机 .....                    | 13  |
| 2-2 线性运算部件 .....                   | 14  |
| 2-3 非线性运算部件 .....                  | 17  |
| 2-4 函数发生器及乘法器 .....                | 18  |
| 2-5 模拟图 .....                      | 19  |
| 2-6 时间比例尺 .....                    | 23  |
| 2-7 幅度比例尺 .....                    | 24  |
| 2-8 模拟计算机仿真举例 .....                | 26  |
| 2-9 模拟计算机的操作 .....                 | 28  |
| 2-10 小结 .....                      | 29  |

|      |                          |    |
|------|--------------------------|----|
| 第三章  | 数字计算机仿真原理 .....          | 30 |
| 3-1  | 数字计算机仿真与模拟计算机仿真的比较 ..... | 30 |
| 3-2  | 数字仿真技术的三个主要方面 .....      | 31 |
| 3-3  | 数字仿真方法 .....             | 33 |
| 3-4  | 数字仿真程序的基本组成 .....        | 34 |
| 3-5  | 面向数学方程或结构图的数字仿真程序 .....  | 35 |
| 3-6  | 小结 .....                 | 36 |
| 第四章  | 用数值积分法进行数字仿真 .....       | 38 |
| 4-1  | 欧拉法 .....                | 38 |
| 4-2  | 预报-校正法 .....             | 40 |
| 4-3  | 计算的稳定性问题 .....           | 40 |
| 4-4  | 龙格-库塔法 .....             | 42 |
| 4-5  | 面向线性状态方程的仿真程序 .....      | 45 |
| 4-6  | 面向非线性状态方程的仿真程序 .....     | 47 |
| 4-7  | 多步法 .....                | 48 |
| 4-8  | 面向微分方程的数字仿真程序CSS1 .....  | 50 |
| 4-9  | 小结 .....                 | 58 |
| 第五章  | 面向结构图的数字仿真 .....         | 60 |
| 5-1  | 面向结构图的数字仿真的优点 .....      | 60 |
| 5-2  | 如何实现面向结构图的数字仿真 .....     | 61 |
| 5-3  | 面向结构图的线性系统数字仿真程序 .....   | 62 |
| 5-4  | 仿真程序CSS2介绍 .....         | 67 |
| 5-5  | 面向结构图的非线性系统数字仿真程序 .....  | 69 |
| 5-6  | 各种运算部件的定义 .....          | 70 |
| 5-7  | 输入格式 .....               | 74 |
| 5-8  | 各种运算部件的运算子程序 .....       | 76 |
| 5-9  | 计算次序的安排 .....            | 78 |
| 5-10 | CSS3程序框图 .....           | 79 |
| 5-11 | 小结 .....                 | 80 |
| 第六章  | 离散相似法 .....              | 83 |

|      |                           |     |
|------|---------------------------|-----|
| 6-1  | 连续系统的离散化 .....            | 83  |
| 6-2  | 信号重构器的特性及传递函数 .....       | 85  |
| 6-3  | 常用环节的离散相似模型 .....         | 88  |
| 6-4  | 离散相似法数字仿真程序CSS4 .....     | 90  |
| 6-5  | CSS4程序框图 .....            | 96  |
| 6-6  | CSS4使用步骤与举例 .....         | 99  |
| 6-7  | 小结 .....                  | 103 |
| 第七章  | 快速与实时仿真方法 .....           | 105 |
| 7-1  | 快速性与实时性——仿真中的两个重要特性 ..... | 105 |
| 7-2  | 可调整数值积分法 .....            | 106 |
| 7-3  | 增广矩阵法 .....               | 108 |
| 7-4  | 实时仿真算法 .....              | 111 |
| 7-5  | 小结 .....                  | 113 |
| 第八章  | 计算机控制系统的数字仿真 .....        | 114 |
| 8-1  | 只要求计算系统输出 $Y(t)$ 时 .....  | 115 |
| 8-2  | 要求计算被控对象中的状态量时 .....      | 117 |
| 8-3  | 被控对象中有非线性环节时 .....        | 119 |
| 8-4  | 小结 .....                  | 120 |
| 第九章  | 数字仿真语言 .....              | 122 |
| 9-1  | 算法语言与数字仿真语言 .....         | 122 |
| 9-2  | 数字仿真语言的基本功能 .....         | 123 |
| 9-3  | 数字仿真语言CSSL .....          | 125 |
| 9-4  | CSSL使用举例 .....            | 129 |
| 9-5  | 小结 .....                  | 131 |
| 第十章  | 数字-模拟混合仿真 .....           | 132 |
| 10-1 | 模拟仿真—数字仿真—混合仿真 .....      | 132 |
| 10-2 | 混合模拟计算机原理 .....           | 132 |
| 10-3 | 数字-模拟混合计算机 .....          | 135 |
| 10-4 | 热连轧机张力控制系统的混合仿真 .....     | 139 |

|      |                            |     |
|------|----------------------------|-----|
| 10-5 | 小结 .....                   | 143 |
| 第十一章 | 仿真器 .....                  | 145 |
| 11-1 | 从飞行仿真器说起 .....             | 145 |
| 11-2 | 训练用仿真器的组成 .....            | 147 |
| 11-3 | 仿真器中的计算机 .....             | 148 |
| 11-4 | 视景系统 .....                 | 150 |
| 11-5 | 船舶操纵训练仿真器介绍 .....          | 154 |
| 11-6 | 小结 .....                   | 156 |
| 第十二章 | 深入学习计算机仿真的五个方面 .....       | 158 |
| 12-1 | 数字仿真方法 .....               | 158 |
| 12-2 | 数字仿真语言 .....               | 158 |
| 12-3 | 数字仿真计算机 .....              | 159 |
| 12-4 | 混合仿真技术 .....               | 159 |
| 12-5 | 离散事件系统的仿真 .....            | 159 |
| 附录   | 四个数字仿真程序 .....             | 162 |
| 一、   | 面向微分方程的数字仿真程序CSS1 .....    | 162 |
| 二、   | 面向结构图的线性系统数字仿真程序CSS2 ..... | 168 |
| 三、   | 面向结构图的非线性系统仿真程序CSS3 .....  | 178 |
| 四、   | 离散相似数字仿真程序 CSS4 .....      | 205 |
| 名词索引 | .....                      | 221 |

# 第一章 既安全又经济的试验方法

## ——在模型上作试验

### 1-1 实际系统与模型

你到过轧钢厂吗？那里有许多轧钢机、传输辊道和卷取机等不同的机器。巨大的轧钢机能将一块块很大的钢锭轧成各种型号的钢板或钢带。每台轧钢机是由许多主传动机构、压下装置等部分组成的，如图 1-1 所示。通常，我们把整个轧钢厂称作为一个轧钢系统，把它的各个部分称作为轧钢系统中的各个子系统。

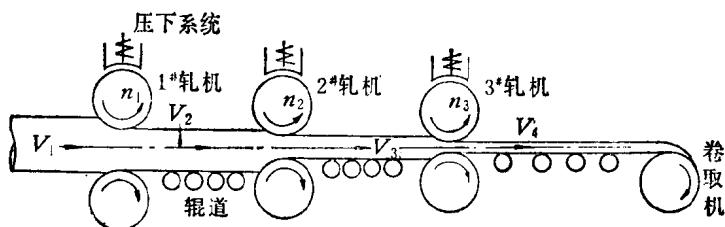


图 1-1 轧钢车间示意图

人们实际接触到的系统往往是十分复杂的，比如刚才介绍的轧钢系统，又比如电力系统，它可能由几十台发电机及几百个用户组成，而每台发电机又由定子，转子等各个部分组成。一架飞机也可看作为一个系统，它由发动机、舵机、导航装置等各个部分组成。随着科学技术及生产水平的提高，系统的复杂程度也日益增加。要研究这些复杂系统首先要将它们分解成许多子系统，然后将各个子系统最为本质

的特性提取出来，并用一个比较简单的形式来描述它，这就是通常所说的系统模型。

比如，要研究一个如图1-1所示的轧钢系统，我们可以将它分解为：主传动系统、压下系统、卷取系统等，而对主传动系统——它的示意图如图1-2所示——又可用图1-3所示的物理模型来表示。

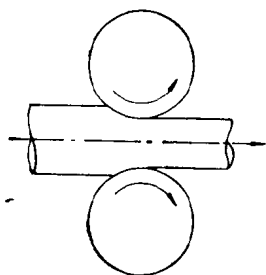


图1-2 主传动系统示意图

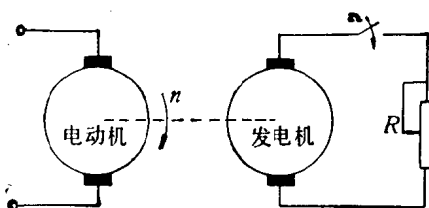


图1-3 主传动系统的物理模型

现在我们可以利用这个物理模型来研究钢材突然咬入时，主传动转速变化的动态过程。即将一台与主传动电动机同轴的发电机看作是轧辊，而用发电机回路中刀闸 $K$ 的闭合来模仿钢材咬入。

根据一些基本物理规律，上述系统也可用以下微分方程来表示：

$$L_a \frac{dI}{dt} + R_a I = u - C_e n \quad (1-1)$$

$$C_m I - M_f = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-2)$$

其中， $L_a$ 、 $R_a$ 为电动机电枢回路的电感与电阻， $M_f$ 为轴上的负载力矩， $C_e$ 、 $C_m$ 为电动机的磁场常数。(1-1)及(1-2)式可以看作是轧机主传动系统的数学模型。

从这个例子中可以看出，对于任何一个复杂系统，我们

总可以设法将它们分解成许多子系统，而对每个子系统又可分别用物理模型或数学模型来加以描述。

对于一个连续系统，它的数学模型通常有以下几种形式：微分方程、传递函数、状态方程及输出方程，它们分别是

$$\begin{aligned} \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y \\ = C_0 \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}} + \cdots + C_{n-1} u \end{aligned} \quad (1-3)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{C_0 s^{n-1} + \cdots + C_{n-1}}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n} \quad (1-4)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & 1 \\ -a_n & \cdots & & & -a_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} u \quad (1-5)$$

$$y = [C_{n-1} \quad C_{n-2} \cdots C_0] \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

其中， $y$  是输出变量， $u$  是输入变量， $x_1, x_2, \cdots, x_n$  是状态变量。

许多物理本质完全不同的系统可能具有完全相同的数学模型，这就是为什么人们对于系统的数学模型十分重视的原因之一。对于数学模型有兴趣的读者可参看文献〔1〕〔2〕。

## 1-2 物理仿真与数学仿真

大家知道，要研究一个系统，就要对系统进行试验，以

便测定系统的各种特性。比如上面所举的轧钢机主传动系统，为了轧出高质量的钢材，希望钢材咬入时，轧辊的转速不发生较为明显的波动，为此有必要测定系统在突然加大负载时，电动机转速的过渡特性。显然，在系统未建成时，不可能对系统进行试验；即使对于已经建成的系统，在实际系统上进行试验也是不经济的（比如轧钢系统，由于它规模很大，进行一次试验要花费很多资金）。有时甚至是不允许的（比如电力系统，核反应堆系统，由于这种系统的安全性将会对社会及人身产生很大的影响，一般是不允许直接在这种实际系统上进行没有把握的试验的）。因此常常要求对模型进行试验，以便获得研究系统所必须的信息。这种在模型上进行试验研究的过程，就叫做仿真。（有的书上也称为模拟，我根据中国自动化学会仿真专业委员会的建议，书中采用“仿真”这一名词，至于“模拟”则另有含义，——请参看第二章。）

由于模型有物理模型与数学模型之分，故仿真也有物理仿真与数学仿真两种。在物理模型上进行试验研究的过程，就称为物理仿真。比如在图 1-3 所示的物理模型上来研究轧钢机主传动系统，就是一种物理仿真。物理仿真能观察到难以用数学来描述的系统特性，这是它的优点。但是它要求模仿实际系统构造出一个和它相似的物理模型，这往往要花费较大的代价，另外，不同的实际系统要求做出不同的物理模型，有时，即使是同一类系统，但由于系统参数不同，其模型常常也要改装，缺乏通用性。

在长期的实践过程中，人们自然会提出这样一个问题：是否能用一个通用的系统来作为各种不同物理本质的实际系统的模型呢？由于不同的实际系统具有相同形式的数学模型，因此在数学模型上进行试验——称为数学仿真——就有

可能不去构造许多形形色色的物理模型，而各种类型的计算机都能解算这些数学方程。因此可以用一套计算机系统来作为各种不同物理本质的实际系统的模型，这样的计算机系统就称为数学仿真系统，简称仿真系统。由于数学仿真是在计算机上进行的，因此也常将数学仿真称为计算机仿真。

数学仿真或计算机仿真是以实际系统和模型之间数学方程式的相似性为基础的。正如上面所说的，一套仿真系统可以对各种类型的实际系统进行试验，这是它的优点，但是，如果一个实际系统尚不能写出它的数学模型，那也就无法对它进行数学仿真，或者写出的数学模型不够完善，那么在这种模型上进行试验也会得出不正确的结论。正是因为物理仿真和数学仿真各有自己的优缺点，因此有时就需要配合起来进行。比如，可以利用物理仿真来建立系统的数学模型，而大量地试验则采用数学仿真；或者通过少数几次物理仿真取得一些必要的实验数据，以便检验数学仿真的结果；有时在一个通用的计算机仿真系统中接入一些难以用数学方程描述的物理模型共同进行试验等等。

因为计算机仿真通用性强，应用范围广，所以本书将着重介绍计算机仿真，至于各种类型的物理仿真则可参阅其它各种专门的书籍。

### 1-3 实时仿真与非实时仿真

计算机仿真根据是否有实物或人介入而分成两大类。一类是有实物或人介入的计算机仿真。比如：在对新型仪表进行运行试验时，往往用计算机来仿真一个生产过程及其中的许多控制器，而将新研制出的仪表直接接到这个仿真系统中去，也就是说，除掉新型仪表是实物以外，其它都用数学模

型来代替；又比如：训练飞行员的飞行仿真器，飞机座舱中的指示仪表通常是实物，另外，飞行员也参加这个仿真系统，所以既有实物介入，又有人介入。对于这一类计算机仿真，要求仿真模型的时间标尺 $\tau$ 和实际系统的时间标尺 $t$ 相同，即时间比例尺 $M_t = \tau/t = 1$ ，我们称它为实时仿真。另一类是没有实物或人介入的计算机仿真。此时，仿真模型的时间标尺可以大于或小于实际系统的时间标尺，我们称它为非实时仿真。如果时间比例尺 $M_t < 1$ ，它表示模型运行得比实际系统快，则称为超实时仿真。反之，如果 $M_t > 1$ ，它表示模型运动得比实际系统慢，则称为欠实时仿真。

## 1-4 最常用的两种仿真计算机

各种通用的或专用的计算机都可构成仿真系统。最初（五十年代）用于仿真目的的计算机是模拟计算机，它是利用电子运算放大器组成各种动态部件（积分器、惯性部件等）及非线性函数部件，然后利用排题板将这些部件连接成系统，并在这个系统上进行试验。六十年代后，数字计算机获得了迅速的发展，不少人采用数字计算机作为仿真计算机。从仿真的目的来看，这两种计算机各有优缺点，下面我们五个方面来进行一些分析与比较：

1. 从仿真速度来看，大家知道，在数字计算机中，由于各种数学运算都要被变换成加、减、乘、除等基本操作，然后由一个运算器一步一步串行完成。所以我们常说，数字计算机的运算是“串行的”。而在模拟计算机中，不同类型的数学运算（如加、减、乘、除、积分等）是由相应的运算部件（如加法器、乘法器、积分器）并行完成的。所以，一般来讲，模拟计算机的计算速度比数字计算机快，当实际系